

화산회토양에서 인 공급원과 시용 수준이 탱자유묘의 생육과 공생균근 형성에 미치는 영향

강석범 · 좌성민 · 문두길 · 한해룡 · 정종배^{1)*}

제주대학교 원예생명과학부 · ¹⁾대구대학교 생명환경학부 농화학전공

Effects of Source and Application Rate of Phosphorus on Growth and Arbuscular Mycorrhizae Formation of Trifoliolate Orange in Volcanic Ash Soil

Seok-Beom Kang · Sung-Min Jwa · Doo-Khil Moon · Hae-Ryong Han · Jong-Bae Chung¹⁾ (Faculty of Horticultural Life Science, Cheju National University Cheju 690-756, ¹⁾Dept. of Agricultural Chemistry, Taegu University, Kyongsan 712-714, E-mail: jbchung@taegu.ac.kr)

ABSTRACT : The effects of two phosphorus sources (fused phosphate and rock phosphate), applied at different rates, on growth, arbuscular-mycorrhizae(AM) formation in roots and nutrient contents of trifoliolate orange grown in an uncultivated volcanic ash soil were investigated in a greenhouse. The seedlings were either inoculated with AM fungi or left uninoculated. Growth of seedlings were best in the treatments of 156-272 mg P/kg with fused phosphate. Although the applied P in the rock phosphate treatments were nearly same or much higher comparing to the fused phosphate treatments, seedling growth were significantly less. Soil available P in the treatment of 272 mg P/kg of fused phosphate was maintained in the range of 3-5 mg/kg during the experiment, and the AM formation was about 60% in average. In the treatments of lower rates of fused phosphate application or of rock phosphate application, soil available P were lower than 3 mg P/kg and AM formations were less than 30 %. Significant increases were found in seedling growth and nutrient absorption due to AM fungi inoculation, and the effects were much more significant in the treatments of higher AM formation. In most of citrus groves in Cheju island, soil available P is much higher than 200 mg P/kg, and average AM formation in citrus roots is less than 30 %. Results obtained in this study show that the formation of AM can be increased at much lower level of available P than the present levels found in citrus groves.

Key words : Phosphorus, Mycorrhizae, *Poncirus trifoliata*, Volcanic ash soil

서 론

제주도 면적의 74 %를 차지하는 화산회토는 인산을 강하게 흡착, 고정하므로 다량의 용성인비의 시용이 권장되어왔고, 그 결과 감귤원 토양중의 유효인산 평균 함량은 415 mg/kg 정도로 조사되어 있다.¹⁾ 이러한 토양환경에서 인산 시비 효율을 높이고 토양의 유실에 따른 지표수의 부영양화나 지하수의 오염을 경감시킬 수 있는 환경친화형 영농체계의 구축은 매우 필요한 과제이다. 제주도 토양에서 발생하는 이러한 인의 시비 효율 문제를 해결하기 위한 방법으로 토양미생물의 이용 가능성에 대한 연구가 그 동안 수 차례 시도되었으나 아직 효과적인 대책은 없는 실정이다.²⁾

인산 고정이 심하고 치환성 양이온의 용탈이 쉬운 화산회토에서 결핍되기 쉬운 무기 영양분과 고정된 인산을 흡수하여 식물체에 공급함으로써 비효를 증진시킬 수 있는 토양미생물인 공생균

근균(arbuscular mycorrhizal fungi)이 농업에 이용될 수 있다면 화학비료의 사용을 줄일 수 있을 것이며, 특히 인산의 흡수 이용을 증대시킬 수 있는 공생균근균은 인산의 고정이 심한 제주도 화산회토양에서 그 이용 가치가 매우 클 것으로 판단된다. 공생균근균에 대한 생태학적 연구나 농업적 이용에 관한 연구는 외국에서 이미 오래 전부터 이루어져 왔으며 특히 식물의 인산 흡수를 촉진하는 효과를 이용하려는 노력은 많은 연구자들의 관심 분야가 되고 있다.³⁾ 공생균근균은 외부균사를 형성하여 식물의 뿌리가 도달할 수 없는 토양에까지 균사를 뻗음으로써 양분 흡수면적을 넓혀 이동하기 힘든 무기양분과 물의 흡수를 용이하게 해준다.⁴⁻⁷⁾ 무기양분의 흡수 외에도 광합성 속도와 내병성을 증가시키며 cytokinin, ABA, GA와 같은 식물 호르몬 축적에도 영향을 미쳐 기주식물의 생장과 수량을 증가시킨다.⁸⁾ 온주밀감의 경우 공생균근균에 감염되었을 때 생육이 더 좋아지며 과즙의 당 함량이 높고 과색도 더 좋게 나타났고, 엽면적이 3배 이상으로 되고

왕성한 생육을 해서 3배 이상의 광합성 산물을 생산한다는 보고도 있으며 내건성을 증대시킨다는 보고도 있어 orange 계통의 파수에서 이러한 공생균근균의 효용성은 이미 널리 인정되고 있다.^{11,14)}

제주 감귤원 토양중의 공생균근균의 동정과 감귤 뿌리에서의 공생균근 형성에 대한 연구는 최근에 시작되었으며¹¹⁻¹⁴⁾ 인산 고정이 심한 제주도 화산회토에서 인산 비료의 이용율을 높이는데 있어 공생균근균을 효율적으로 이용할 수 있는 방법과 기술은 아직 매우 기초적인 수준에서 연구되고 있다. 공생균근의 형성은 토양중의 유효인산 함량과 밀접한 관계를 갖는데, 유효인산 함량이 과도하면 형성율이 낮아지고 반대로 지나치게 낮아도 작물생육이 부진해지며 따라서 공생균근의 형성도 저해된다. 따라서 우선적으로 감귤나무 뿌리에 대한 공생균근균의 감염율을 높여 토양중의 잔류 유효인산을 효과적으로 흡수 이용할 수 있도록 하여 인산 소비량을 감소시킬 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

본 연구에서는 제주도 화산회토양에서 용성인비와 인광석 사용 수준별로 감귤나무 내목으로 사용되는 탱자유묘의 생육과 공생균근 형성 및 양분흡수 관계를 조사하여 화산회토 감귤원에서 공생균근균을 효율적으로 이용할 수 있는 토양 인산 수준을 검토하였다.

재료 및 방법

제주시 오등동에 위치한 감귤원 주변에서 1998년 10월에 채취한 탱자 종자를 30% 황산액에 30분 동안 침지한 다음 수돗물로 깨끗이 씻어 종자에 묻은 점액질을 제거하였다. 비미클라이트로 채워진 유묘 상자에 2cm 간격으로 파종하여 1999년 2월 10일부터 4월 1일까지 50일 동안 주간 28℃ 야간 25℃의 유리온실에서 이를 간격으로 관수하며 육묘하였고, 본엽 4~5매가 있는 생육이 고른 유묘를 선발하여 시험에 이용하였다.

공생균근균 접종재료로는 공생균근균 많이 감염되어 있는 감귤나무 뿌리를 이용하였는데, 제주대학교 부속농장에 위치한 감귤원에서 온주밀감 뿌리를 접종 당일 채취하여 공생균근균 감염율이 25%내외인 직경 1mm 이하의 뿌리를 1cm 정도의 길이로 잘라두었다.

토양은 서귀포시 토평동에 위치한 제주대학교 아열대농업연구소내의 비경작지 화산회토양을 고압증기 멸균기로 121℃에서 1시간씩 2회 증기 멸균한 후 시험에 이용하였으며 토양의 물리화학적 특성은 표 1과 같다.

Table 1. Chemical properties of soil used in the experiment

pH	Tot. N %	O.M %	Av. P mg/kg	Ex. cations		
				K	Ca	Mg
				cmol/kg		
5.6	0.65	23.0	0.81	0.85	1.63	0.42

Table 2. Treatments of phosphorus.

Treatment	Fused Phosphate	Rock Phosphate	Complex fertilizer	Total P applied	
	g P/50L soil			g P/50L soil	mg P/kg soil
F0	-	-	3	3.00	40
F1	2.18	-	3	5.18	66
F2	4.35	-	3	7.35	98
F3	8.70	-	3	11.70	156
F4	17.40	-	3	20.40	272
R1	-	14.95	3	17.95	239
R2	-	29.90	3	32.90	439

인산공급원으로는 용성인비와 인광석을 이용하였으며 자세한 수준별 처리내용은 표2에 나타내었다. 모든 처리에 복비 (21-17-17)를 토양 50L당 40g씩 처리하였다. 인산 처리별로 공생균근균 접종구와 무접종구로 나누었으며, 접종구의 경우 15반복, 무접종구의 경우 4반복으로 시험하였다.

직경 15cm, 높이 20cm의 화분에 인산이 처리된 토양을 2/3정도 채우고 화분 당 접종재료 5g(약 200개의 절편)씩을 골고루 뿌린 다음 화분 당 탱자 유묘 2본씩을 심고 나머지 토양을 채웠다.

제주대학교 감귤화훼과학기술센터 유리온실에서 완전임의배치법으로 배치하여 1998년 4월 2일부터 1998년 10월 2일까지 5개월 동안 5일 간격으로 관수하며 재배하였다.

식물체의 초장, 엽수, 생체중과 건물중, 줄기 직경을 조사하였는데, 초장은 식물체가 심겨진 화분의 윗면을 기준으로 측정하였고, 줄기 직경은 지면에서 1cm 부위를 측정하였으며, 생체중은 토양에서 분리한 식물체를 수돗물로 잘 씻어 물기를 제거한 후 무게를 측정하였고, 건물중은 생체중을 측정된 유묘를 60℃에서 4일간 건조한 후 측정하였다.

공생균근 형성율은 식물체의 생체중을 측정하고 난 뿌리 일부를 FAA용액 (formalin 1 : glacial acetic acid 1 : ethanol 1, v/v/v)에 고정시켰다가 Phillips와 Hayman의 방법으로 조사하였다.¹⁵⁾ 즉, FAA용액 속에 담가 두었던 뿌리를 꺼내어 물로 잘 행군 다음 1cm 길이의 절편으로 절단하여 1개의 식물체 당 50개의 뿌리 절편을 만들었다. Acid fuchsin 염색법에 의해 먼저 절단된 뿌리절편을 시험관속에 넣고 10% KOH를 뿌리가 잠길 정도로 채워 90℃에서 5분간 가열한 후 KOH용액을 버리고 수돗물로 깨끗이 씻었다. 그리고 alkaline H₂O₂(3mL NH₄OH + 30mL 10% H₂O₂ + 567mL 수돗물)를 넣어 3분간 방치하여 탈색시킨 후 수돗물로 깨끗이 씻고 1% HCl 용액에 넣은 다음 HCl 용액을 버리고 acid fuchsin 염색용액을 넣어 90℃에서 10분간 증탕한 후 50분 동안 실온에 방치하여 염색하였다. 염색된 뿌리 시료는 받침 유리 위에 올려놓고 덮개유리를 덮고 압착하여 해부현미경(Kyowa, Sel-3)으로 40배에서 공생균근균으로 감염된 뿌리를 조사하였으며, 공생균근 형성율은 다음 식으로 계산하였다.

$$\text{형성율(\%)} = (\text{감염된 뿌리 절편수/관찰한 뿌리 절편수}) \times 100$$

토양의 pH는 토양과 물의 1:5 현탁액 중에서 유리전극으로 측정하였고 토양중 총질소는 Kjeldahl법으로 분석하였다. 유효인산은 Bray No 1. 법으로 추출하여 ammonium paramolybdate법으로 발색시켜 분광광도계로 정량하였다.¹⁶⁾ 치환성 양이온은 1N ammonium acetate로 추출하여 원자흡광분석기로 분석하였고, 유기물 함량은 Walkley-Black법으로 분석하였다.¹⁷⁾

식물체는 건물중을 측정한 후 지상부와 지하부를 합쳐서 분쇄한 한 시료를 진한황산으로 분해하여 분석에 이용하였다. 질소는 Kjeldahl법으로 증류한 후 적정법으로 정량하였고, 인은 ammonium paramolybdate법으로 발색시켜 분광광도계로 측정하였으며, K, Ca, Mg, Cu, Zn은 원자흡광분석기로 분석하였다.

결과 및 고찰

탱자 유묘의 재배에는 비경작지 화산회 토양을 사용하였는데, 유효 인산 함량은 1 mg/kg 이하였고 약산성의 반응을 보였다. 치환성 염기의 함량은 비교적 낮았는데 칼륨은 복합비료로 보충되었고 칼슘은 인산비료와 함께 일부 보충되었다. 경작지 토양, 특히 제주도 감귤원 토양에는 인산 비료의 장기간 연용에 따라 잔류 유효인의 함량이 높아 본 연구의 목적에 부적합하여 유효 인산의 함량이 낮은 비경작지 화산회토양을 사용하였다.

유묘 재배기간 동안의 토양 중의 유효 인산 함량 변화는 그림 1과 같다. 용성인비 272 mg/kg 처리구에서 유묘 재배기간 동안 3.2-5.5 mg P/kg으로 유지되어 가장 높았으며, 인광석 처리구와 용성인비 F1 및 F2 처리구에서는 탱자 유묘 재배기간 동안 3 mg P/kg 수준 이하로 유지되어 무처리구와 비교하여 크게 차이 나지 않았다. 이러한 낮은 유효 인산 함량은 용해도가 낮은 비종의 처리와 인산의 흡착이 강한 화산회 토양의 특성에 기인하는 것으로 판단되었다.

인산 처리별 탱자 유묘의 생육은 5개월간 재배한 후 초장, 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중으로 조사하였다. 초장을 보면

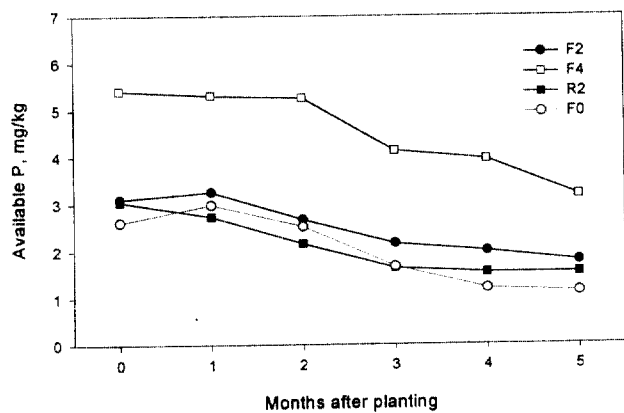


Fig. 1. Changes of the contents of available P in soil during the experiment.

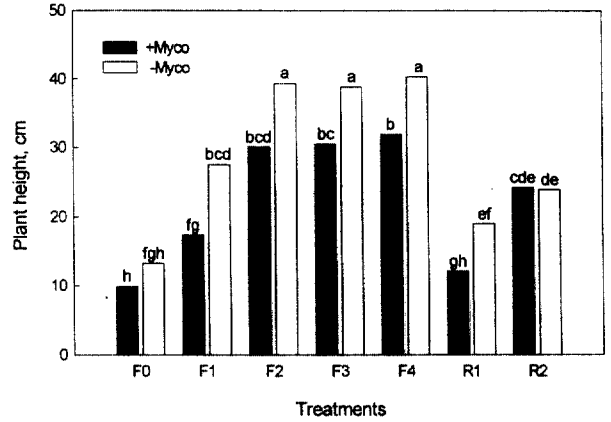


Fig. 2. Height of mycorrhizae and non-mycorrhizae trifoliolate orange seedlings at different P levels applied with fused phosphate and rock phosphate. Letters on the bars are mean separation by DMRT at 5 % level.

(그림 2), 용성인비 시용구에서는 처리 수준이 증가함에 따라 초장이 증가하였으나 98 mg P/kg 이상의 처리 수준에서는 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 인광석 처리구에서는 용성인비 처리구에 비해 인산 처리 수준이 높았음에도 초장은 상대적으로 짧았다. 이는 그림 1에서 본 바와 같이 토양 중에서 인광석의 용해도가 매우 낮아 식물 생육에 필요한 인의 공급이 충분하지 못하였기 때문으로 생각되며, 재배 기간중 무처리구를 비롯하여 F1, R1, R2 처리구에서는 일부 인산 결핍 증상이 관찰되었다. 공생균근 접종 효과는 무처리구와 R2 처리구를 제외한 나머지 처리구에서 통계적으로 유의성 있게 나타났으며, 초장이 가장 긴 처리구인 F2, F3, F4에서 공생균근 비접종구에 비해 접종구에서 30% 정도의 초장 증가 효과를 보였다.

지상부의 생체중과 건물중 조사 결과는 그림 3에 나타내었는데, 생체중과 건물중은 용성인비 272 mg P/kg 처리구(F4)에서 가장 많았는데, 98 및 156 mg P/kg 처리구(F2와 F3)와 비교할 때 통계적인 차이는 없었다. 초장과 마찬가지로 인광석 처리구에서는 인산 처리 수준으로 비교하였을 때 용성인비 처리구에 비해 상대적으로 지상부 생육이 크게 낮았다. 지상부의 생체중과 건물중도 초장과 마찬가지로 공생균근 처리에 따라 증가하였는데, 그 효과는 용성인비 처리구들에서 뚜렷하였으며 인광석 처리구와 무처리구에서는 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다.

지하부의 생육도 생체중과 건물중으로 조사하였는데 (그림 4), 용성인비 처리의 경우 인산 시용량이 증가할수록 지하부의 생육이 증가하였으며, 272 mg P/kg 처리구에서 가장 컸고 생체중과 건물중 모두 156 mg P/kg 처리구와 비교할 때, 통계적으로 유의성 있는 차이는 없었다. 인광석 처리구에서는 역시 인산 처리 수준으로 비교하였을 때 용성인비 처리구에 비해 지하부 생육이 크게 낮았다. 공생균근 처리는 다른 생육 조사의 경우와 마찬가지로 대부분 처리구에서 지하부의 생육을 크게 증가시켰으며, 그 효과는 용성인비 처리구들에서 뚜렷하였으며 인광석 처리구와 무

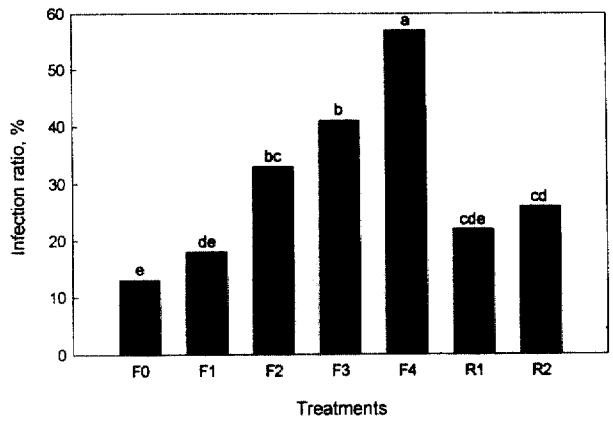
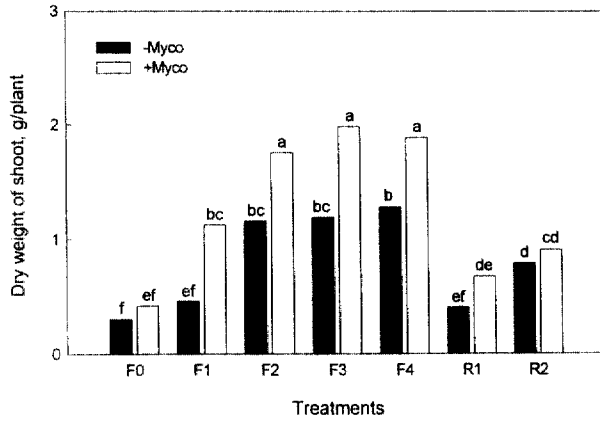
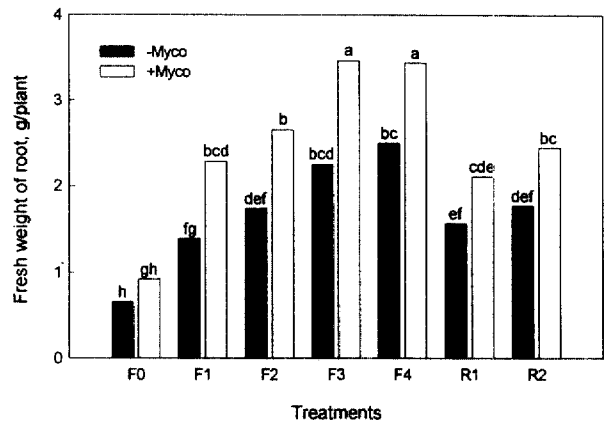
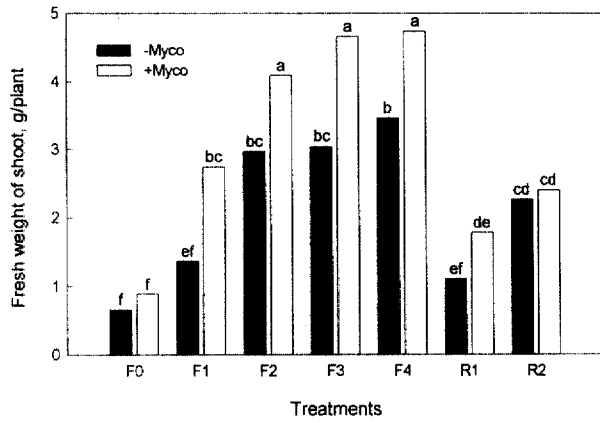


Fig. 3. Shoot growth of mycorrhizae and non-mycorrhizae trifoliolate orange seedlings at different P levels applied with fused phosphate and rock phosphate. Letters on the bars are mean separation by DMRT at 5 % level.

Fig. 4. Root growth of mycorrhizae and non-mycorrhizae trifoliolate orange seedlings at different P levels applied with fused phosphate and rock phosphate. Letters on the bars are mean separation by DMRT at 5 % level.

처리구에서는 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다.

인산 시용 수준별로 탱자 유묘에서 공생균근 형성율을 조사한 결과는 그림 5에 나타내었다. 용성인비 시용구에서는 인산 시용 수준이 증가할수록 공생균근 형성율은 증가하였다. 약 270 mg P/kg 처리 수준인 F4 처리구에서 60%에 가까운 높은 공생균근 형성율을 보였으며, 이 처리구에서 유묘 재배기간중의 토양중 유효인산 함량은 3.2-5.5 mg/kg 수준으로 유지되었다. 인광석 처리구에서는 실제 인산 처리량에 비하여 토양 중 유효인산의 함량은 매우 낮았으며 공생균근 형성율도 낮았다. 일반적으로 토양 중 유효 인산의 농도나 식물체중의 인산 함량이 증가할수록 공생균근의 형성이나 그 효과가 감소하는 것으로 알려져 있다.^{18,19)} 그러나 인산의 함량이 매우 낮은 경우 공생균근의 형성이 감소하는 현상도 인정되고 있다. Asmah는 22 kg P/ha로 인광석을 처리하였을 때 인산을 처리하지 않은 경우나 44kg P/ha로 과석을 처리했을 때보다 옥수수 뿌리에서 공생균근의 형성이 많은 것으로 보고하였고,²⁰⁾ Habata와 Fox는 토양 종류에 따라 적당한 인산의 농도를 유지해줄 때 citrus에서 공생균근의 형성이나 그 효율이 좋았다고 했다.²¹⁾ 일정 수준까지 인산 시용량을 증가시키면 citrus 뿌리의 성장과 함께 공생균근균에 감염된 뿌리의 길이도

증가한다고 한다.²²⁾ 이들 결과를 통해 보면 토양중의 심한 인산 결핍을 완화시킬 수 있을 정도의 인의 시용은 공생균근의 형성을 촉진시키며 적정 수준을 넘는 인산 농도는 오히려 공생균근의 형

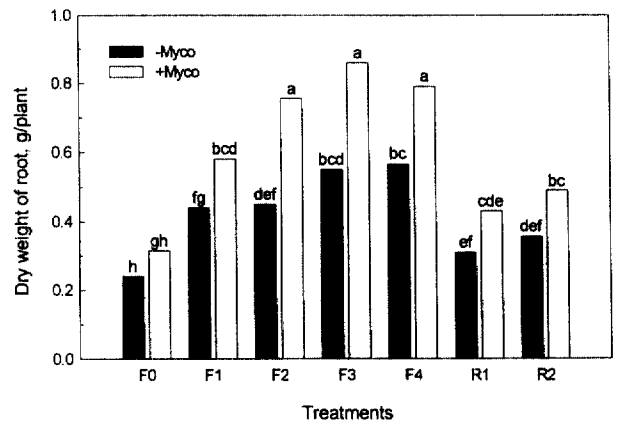


Fig. 5. Root mycorrhizae formation percentage of trifoliolate orange seedlings at different P levels applied with fused phosphate and rock phosphate. Letters on the bars are mean separation by DMRT at 5 % level.

Table 3. Correlation coefficients between the ratio of AM formation of root and growth characters in trifoliolate orange seedlings as affected by the different amounts and source of phosphorus.

Treatment	AM formation ratio		Growth characters			
	Range	Average	Shoot length	Fresh shoot wt.	Fresh root wt.	Dry shoot wt.
	%		cm	g	g	g
F0	2 - 28	13	0.010	0.017	0.060	0.001
F1	2 - 52	18	0.429	0.402	0.528 [*]	0.478 [*]
F2	6 - 50	33	0.443	0.417	0.619 ^{**}	0.519 [*]
F3	10 - 74	41	0.563 [*]	0.660 ^{**}	0.490 [*]	0.635 ^{**}
F4	8 - 92	57	0.629 ^{**}	0.600 ^{**}	0.569 [*]	0.678 ^{**}
R1	10 - 40	22	0.551 [*]	-0.140	0.324	-0.003
R2	2 - 44	26	-0.200	0.399	0.498 [*]	0.455

성을 저해하게 된다. 지나치게 낮은 인산 농도 조건에서는 공생균근의 생육 자체가 저해되며²³⁾ 인산을 적절히 공급함으로써 균의 생장을 촉진시키거나 기주식물의 대사과정에 영향을 미쳐 간접적으로 공생균근의 형성을 촉진하는 것으로 해석할 수 있다.²²⁾ 인산은 기주식물의 광합성 효율을 증대시키므로 공생균근균이 이용할 수 있는 뿌리의 탄수화물 농도를 증가시켜 공생균근 형성을 촉진시킬 수 있다.²⁴⁾ 제주도 화산회토양에서도 인산 함량이 1 mg/kg 내외일 경우 공생균근 형성율이 10-20 % 수준에 머무르는 것으로 알려져 있다.¹³⁾

공생균근의 형성과 탱자 유묘의 생육관계를 규명하기 위하여 각각의 인산처리구별로 공생균근 형성율과 유묘 생육간의 상관관계를 조사하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 토양중의 유효 인산함량이 상대적으로 낮은 처리구들에서는 평균 공생균근 형성율도 낮았고 탱자유묘의 생육과의 상관관계가 낮아 공생균근의 형성이 실질적으로 유묘 생육에 크게 효과를 미치지 못하는 것으로 판단되었다. 반면 F3 및 F4 처리구에서는 평균 공생균근 형성율이 높았으며 탱자 유묘의 생육과 높은 상관관계를 보여 공생균근의 형성이 실제 유묘의 생육에 긍정적인 효과를 미치는 것으로 판단되었다. Oh 등의 연구 결과에서도 공생균근 형성율이 20% 이하인 경우에는 탱자 유묘의 생육에 영향을 미치지 못하였으며,

형성율이 30% 이상인 경우에는 일부 생육 촉진 효과를 보이는 것으로 나타났다.¹³⁾ 물론 토양 중의 인을 비롯한 무기성분의 함량이나 수분 조건 등에 따라서 공생균근 형성율에 따른 식물 생육 효과가 달라질 수 있겠지만 본 연구와 같은 조건에서는 공생균근 형성율이 최소한 30% 이상 되어야 식물생육 촉진 효과가 발현 될 수 있을 것으로 생각된다.

공생균근이 식물 생육을 촉진할 수 있는 이유는 뿌리의 무기양분이나 물의 흡수를 촉진시킬 수 있기 때문이다. 특히 유효도가 낮은 인산의 흡수 촉진 효과는 공생균근의 역할 중에서 가장 중요시되고 있다. 공생균근의 형성이 탱자 유묘의 무기 양분 흡수에 미치는 효과는 표 4에 나타내었다. 평균적인 공생균근 형성율이 높았던 F3 및 F4 처리구에서 공생균근의 형성율이 증가함에 따라 인과 질소를 비롯한 무기양분의 흡수가 증가하는 것으로 나타났으며, 구리의 경우에는 흡수 촉진 효과가 인정되지 않았다. 공생균근 형성율이 낮았던 F1과 F2 처리구에서도 일부 무기양분의 흡수 촉진 효과가 인정되었으나, 인산 무처리구에서는 공생균근 형성율이 매우 낮았으며 공생균근 형성율이 무기양분의 흡수에 뚜렷한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 인광석을 처리한 R1구에서는 인과 아연을 제외한 무기양분의 흡수와 공생균근 형성율 간에 유의한 상관관계가 있었으나 공생균근 형성율이 상대적으로 높았던 R2구에서는 공생균근 형성율과 무기양분 흡수 사이의 상관관계가 매우 낮았는데 이러한 결과에 대한 이유는 불분명하다. 공생균근이 식물의 무기양분 흡수에 미치는 효과에 대한 연구는 이미 많이 이루어져 왔다. Vinayak와 Bagyaraj는 공생균근균에 감염된 탱자에서 아연, 구리 등의 흡수가 증가된다고 하였고,²⁵⁾ Krikum과 Levy는 sour orange, cleopatra mandarin, rough lemon에서 잎 중의 마그네슘 함량은 공생균근이 형성된 식물체에서 높았으나, 칼슘의 함량은 감염되지 않은 식물체에서 더 높았다고 하였다.²⁶⁾ 질소의 흡수에 미치는 공생균근의 효과는 감귤류에서는 인정되지 않는 것으로 알려져 있다.²⁷⁾ 아연의 흡수 촉진 효과는 Manjunath 등이 citrus 유묘에서도 조사한 바 있는데,²⁸⁾ 공생균근으로 인한 아연의 흡수 증가는 과도한 인산 시용으로 인한 미량 원소의 결핍 현상이 초래되는 제주도 화산회토에서 공생균근 이용의 중요성을 평가할 수 있는 또 다른 요인이라 할 수 있다.

Table 4. Correlation coefficients between the ratio of AM formation of root and amount of nutrients in plant tissue per plant in trifoliolate orange seedlings as affected by the different amounts and sources of phosphorus.

Treatment	AM formation ratio		Nutrients							
	Range	Average	P	N	K	Ca	Mg	Cu	Zn	
	%									
F0	2 - 28	13	0.031	0.014	0.167	0.177	0.223	-0.218	0.291	
F1	2 - 52	18	0.362	0.469 [*]	0.431	0.498 [*]	0.545 [*]	0.210	0.138	
F2	6 - 50	33	0.445	0.561 [*]	0.463 [*]	0.357	0.376	0.390	0.752 ^{**}	
F3	10 - 74	41	0.654 ^{**}	0.581 ^{**}	0.553 [*]	0.504 [*]	0.511 [*]	0.179	0.561 [*]	
F4	8 - 92	57	0.578 ^{**}	0.684 ^{**}	0.596 ^{**}	0.656 ^{**}	0.670 ^{**}	0.080	0.334	
R1	10 - 40	22	0.438	0.469 [*]	0.477 [*]	0.489 [*]	0.466 [*]	0.702 ^{**}	0.383	
R2	2 - 44	26	0.180	0.020	0.004	0.063	0.178	0.117	-0.469	

앞에서도 지적한 바와 같이 인의 흡수를 촉진시키는 것은 공생균근의 가장 중요한 역할이며, 공생균근 연구의 주된 관심 분야로 현재까지 꾸준히 연구 보고되고 있다. 인산의 고정이 심한 화산회토양의 제주도 감귤원에서 인산 이용율을 높이기 위한 효과적인 수단인 하나로 공생균근의 이용을 들고 있는데, 표 4의 결과를 보면 결국 토양중의 유효 인의 함량이 3-5 mg P/kg 정도로 낮더라도 공생균근 형성율이 높아지면 식물이 효과적으로 인을 흡수 이용할 수 있는 것으로 나타났으며, 표 3에 나타난 공생균근 형성율에 따라 증가하는 작물의 생육도 결국 이러한 무기 양분의 흡수 촉진 효과에 기인하는 것으로 볼 수 있을 것이다.

제주도 비경작지 화산회토양에서 탱자 유묘를 공시한 이 실험에서 공생균근의 형성이 유묘의 생육과 인을 비롯한 질소, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 무기 양분의 체내 흡수를 증가시키는 것으로 나타난 결과는 다른 작물 또는 다른 토양의 감귤류에서 얻어진 결과들과 대체로 일치하였으며, 토양중의 유효인산의 함량이 3-5 mg P/kg의 수준으로 비교적 낮게 유지되었음에도 공생균근의 형성율이 높았으며 유묘의 생육도 양호하였다. 현재 화산회토양 감귤원에서 유효인산의 함량이 200 mg P/kg 이상으로 축적되어 있고, 이러한 감귤원에서는 공생균근의 형성율이 30% 이하로 나타나고 있는데,¹¹⁾ 인산 사용량을 줄이고 토양중 유효인산의 과도한 축적을 완화시켜 공생균근의 형성율과 그 역할을 증대시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 실제 감귤원 포장에서 공생균근 형성율을 높일 수 있는 적정 인산 수준의 검토를 포함한 공생균근의 효용성을 증진시킬 수 있는 기타 방안들을 계속 모색해 나가면 인산 고정이 심한 화산회토에서 관행적으로 이루어지고 있는 과량의 인산 시용을 비롯한 전반적인 시비량의 절감을 통한 환경보전형 감귤원 관리기술의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

요 약

제주도 비경작지 화산회토양에서 탱자 유묘를 공시하여 용성인비와 인광석을 인산급원으로 하고 인산 시용 수준별로 유묘의 생육, 공생균근의 형성 및 무기 양분의 흡수를 조사하였다. 156-272 mg P/kg 수준의 용성인비 시용구에서 유묘의 생육이 가장 양호하였으며, 인광석 처리구에서는 용성인비와 동일한 수준 또는 그 이상으로 처리하여도 유묘 생육은 용성인비 처리에 미치지 못하였다. 용성인비 272 mg P/kg 처리구에서, 토양중의 유효인산의 함량이 3-5 mg P/kg의 수준으로 비교적 낮게 유지되었음에도 공생균근의 형성율이 60% 정도로 높았으며, 용성인비 수준이 낮은 처리구와 인광석 처리구에서는 토양 유효인산 함량이 3 mg P/kg 이하였으며, 공생균근 형성율도 낮았다. 공생균근 형성율이 높은 처리구에서는 공생균근의 형성에 따라 유묘의 생육이 30% 이상 증가하였으며 무기양양분의 흡수 또한 증가하였다. 현재 화산회토양 감귤원에서 유효인산의 함량이 200 mg P/kg 이상으로 축적되어 있고, 이러한 감귤원에서는 공생균근의 형성율이 30% 이하로 나

타나고 있는데, 인산 사용량을 줄이고 토양중 유효인산의 과도한 축적을 완화시켜 공생균근의 형성율과 그 역할을 증대시킴으로써 화산회토양 감귤원에서 관행적으로 이루어지고 있는 인산 과다 시비와 그에 따른 환경오염 문제를 해결할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 '98 과학기술기초중점연구 지원과제의 연구비로 수행되었음.

참고 문헌

1. Hyun, S. W. (1996). Sustainable agriculture in Cheju island. Proc. of Int'l Symposium on Sustainable Agriculture. Cheju National University Subtropical Horticulture Research Center. pp.119-139.
2. Kim, H.O., Lee, S.C. and Hyun, H.N. (1989). A study on the utilization of residual phosphate in volcanic ash soils. Research Reports of RDA. 32:109-115.
3. Bolan, N.S. (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant Soil. 65:189-207.
4. Elmes, R. P. and Mosse, B. (1984). Vesicular-arbuscular endo mycorrhizae inoculum production. II. Experiments with maize(*zea mays*) and other hosts in nutrient flow culture. Can. J. Bot. 62:1531-1536.
5. Jensen, A. (1982). Influence of four vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on nutrient uptake and growth in Barley(*Hordeum vulgare*). New Phytol. 90:45-50.
6. Menge, J. A. (1983). Utilization of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. Can. J. Bot. 61:1015-1024.
7. Kothari, S. K., Marschner, H. and Romheld, V. (1991). Contribution of the VA-mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in a calcareous soil. Plant Soil 131:177-185.
8. Smith, S. E. (1988). Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. Ann. Rev. Plant Physiol Plant Mol. Biol. 39:221-224.
9. Sherstha, Y.H., Ishii, T. and Kadoya, K. (1995). Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis, transpiration and the distribution of photosynthates of bearing satsuma mandarin trees. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 64:517-525.
10. Ishii, T. Y., Shrestha, H. and Kadoya, K. (1993). Effect of vesicular-arbuscular(VA) mycorrhizal fungi on tree

- growth, fruit development and fruit quality, and water stress of satsuma mandarin trees. Jour. Jap. Soc. Hort. Sci. 62(sup.1):26-27.
11. Chung, J.B., Moon, D.K., Han H.R. and Kim, H.C. (1997). Arbuscular-mycorrhizae formation and nutrient status of citrus plants in Cheju. Korean J. Environ. Agri. 16:181-186.
 12. Lee, Y.S., Chung, J.B. and Moon, D.K. (1998). Identification of mycorrhizal fungi identified on citrus orchard soils in the island of Cheju. Korean J. Mycol. 26:97-102.
 13. Oh, H.W., S.Y. Kim, H.R. Han, D.K. Moon, and J.B. Chung. 1998. Effects of arbuscular mycorrhizae on growth and mineral nutrient contents in trifoliolate orange seedling. Kor. J. Environ. Agric. 17:182-188.
 14. Kim, S.Y., H.W. Oh, H.R. Han, D.K. Moon and J.B. Chung. 1998. Seasonal changes in colonization and spore density of arbuscular mycorrhizae in citrus groves.
 15. Philipps, J.M. and Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Trans. Mycol. Soc. 55:158-161.
 16. Olson, S.R. and Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. pp 403-430. In A.L. Page et al., (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
 17. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. (1982). Total C, organic C, and organic matter. pp539-579. In A.L. Page et al., (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
 18. Schubert, A. and Hayman, D.S. (1986). Plant responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. XVI. Effectiveness of different endophytes at different levels of soil phosphate. New Phytol. 103:79-90.
 19. Menge, J.A., Steirle, D., Bagyaraj, D.J., Johnson, E.L.V. and Leonard, R.T. (1978). Phosphorus concentration in plant responsible for inhibition of mycorrhizal infection. New Phytol. 80:575-578.
 20. Asmah, A.E. (1995). Effect of phosphorus source and rate of application on VAM fungal infection and growth of maize (*Zea mays* L.). Mycorrhiza. 5:223-228.
 21. Habate, M. and Fox, R.L. (1993). Effectiveness of VAM fungi in nonsterile soils before and after optimization of P in soil solution. Plant Soil. 151:219-226.
 22. Bolan, N.S., Robson, A.D. and Barrow, N.J. (1984). Increasing phosphorus supply can increase the infection of plant roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Biol. Biochem. 16:419-420.
 23. Same, B.I., Robson, A.D. and Abbott, L.K. (1993). Phosphorus, soluble carbohydrates and endomycorrhizal infection. Soil Biol. Biochem. 15:593-597.
 24. Johnson, C.R. (1984). Phosphorus nutrition on mycorrhizal colonization, photosynthesis, growth and nutrient composition of *Citrus aurantium*. Plant Soil. 80:35-42.
 25. Vinayak, K. and Bagyaraj, D.J. (1990). Selection of Efficient VA mycorrhizal fungi for trifoliolate orange. Biol. Agri. Hort. 6:305-311.
 26. Krikum, J. and Levy, Y. (1980). Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza on citrus growth and mineral composition. Phytoparasitica. 8:195-200.
 27. Hartmond, U., Schaesberg, N.V., Graham, J.H. and Syvertsen, J.P. (1987). Salinity and flooding stress effects on mycorrhizal and nonmycorrhizal citrus rootstock seedlings. New Phytol. 105:37-43.
 28. Manjunath, A., Mohan, R. and Bagyaraj, D.J. (1983). Response of citrus to vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation in unsterile soils. Can. J. Bot. 61:2729-2732.